

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公表特許公報 (A)

(11)特許出願公表番号  
特表2002-500369  
(P2002-500369A)

(43)公表日 平成14年1月8日(2002.1.8)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 1 B 11/25		G 0 6 T 1/00	3 1 5 2 F 0 6 5
G 0 6 T 1/00	3 1 5	G 0 1 B 11/24	E 5 B 0 5 7

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 47 頁)

(21)出願番号 特願2000-526877(P2000-526877)  
(86)(22)出願日 平成10年12月31日(1998.12.31)  
(85)翻訳文提出日 平成12年6月29日(2000.6.29)  
(86)国際出願番号 P C T / U S 9 8 / 2 7 9 1 5  
(87)国際公開番号 W O 9 9 / 3 4 3 0 1  
(87)国際公開日 平成11年7月8日(1999.7.8)  
(31)優先権主張番号 6 0 / 0 7 0 , 1 3 8  
(32)優先日 平成9年12月31日(1997.12.31)  
(33)優先権主張国 米国 (U S)

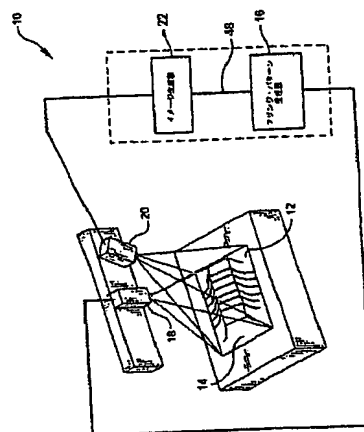
(71)出願人 ザ リサーチ ファウンデーション オブ  
ステイト ユニヴァーシティ オブ ニ  
ューヨーク  
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 12201  
-0009 アルバニ ビーオーボックス 9  
(72)発明者 ヒューアン ベイセン エス  
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 11727  
コラム タウンハウス ドライヴ 4307  
(72)発明者 チアン フー ベン  
アメリカ合衆国 ニューヨーク州 11790  
ストーニー ブルック アコーン レー  
ン 29  
(74)代理人 弁理士 中村 稔 (外9名)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 デジタル・ビデオ投影システムを使用して三次元表面輪郭描画を行う方法および装置

(57)【要約】

三次元表面輪郭描画方法は、フルフィールド・フリンジ投影技術に基づいている。デジタル・ビデオ投影システム(18)が用いられ、対象物(12)上へデジタル的に創作したフリンジ・パターンを投影する。対象物表面(14)の幾何学的形状によってゆがめられたフリンジ・パターンを、次に、高解像度CCDカメラ(20)によってキャプチャする。輪郭描画解像度を高めるために、純粋にソフトウェアベースのデジタル移相技術を用いる。この技術により、従来の移相法で必要としている精密位置決めシステムが不要となる。表面(14)は、位相重ね・位相重ね解除アルゴリズムを適用することによって再構築される。



**【特許請求の範囲】**

【請求項1】 対象物の表面に三次元データ支持用フリンジ・パターンを設ける方法であって、（a）デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成する段階と、（b）前記信号を光学フリンジ・パターンに変換する段階と、（c）前記対象物の前記表面上へ前記フリンジ・パターンを投影する段階とを包含することを特徴とする方法。

【請求項2】 対象物の表面へフリンジ・パターンを投影する装置であって、デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成するフリンジ・パターン生成器と、このフリンジ・パターン生成器に接続してあって、前記信号を受け取り、それを光学フリンジ・パターンに変換し、このフリンジ・パターンを前記対象物の前記表面へ投影するデジタル・ビデオ・プロジェクタを包含することを特徴とする装置。

【請求項3】 請求項2に記載の、フリンジ・パターンを投影する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、前記フリンジ・パターンを生成するように構成した回路であることを特徴とする装置。

【請求項4】 請求項2に記載の、フリンジ・パターンを投影する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、前記フリンジ・パターンを生成するようにプログラムしたコンピュータであることを特徴とする装置。

【請求項5】 幾何学的形状を構成している表面を有する対象物の三次元表面輪郭を描画する方法であって、（a）デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成する段階と、（b）前記信号を光学フリンジ・パターンに変換する段階と、（c）前記表面上へ前記フリンジ・パターンを投影し、このフリンジ・パターンが前記対象物の前記幾何学的形状によってゆがめられる段階と、（d）光学検索装置で前記ゆがめられたフリンジ・パターンの反射を検索する段階とを包含することを特徴とする方法。

【請求項6】 幾何学的形状を構成している表面を有する対象物の三次元表面輪郭を描画する装置であって、デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成するフリンジ・パターン生成器と、前記フリンジ・パターン生成器に接続してあって、前記信号を受け取り、光学フリンジ・パターンに変換し、前記フ

リング・パターンを前記表面へ投影し、そこで前記FRINGE・パターンが前記対象物の前記幾何学的形状によってゆがめられるデジタル・ビデオ・プロジェクタと、前記ゆがめられたFRINGE・パターンの反射を検索する光学検索装置とを包含することを特徴とする装置。

【請求項7】 幾何学的形状を構成している表面を有する対象物の三次元表面輪郭を描画する方法であって、(a)複数のデジタル的に解釈可能な移相FRINGE・パターン信号を生成する段階と、(b)前記信号を光学的な移相FRINGE・パターンに変換する段階と、(c)前記表面へ前記FRINGE・パターンを投影し、前記FRINGE・パターンが前記対象物の前記幾何学的形状によってゆがめられる段階と、(d)前記ゆがめられたFRINGE・パターンの各々の反射を個別に検索する段階と、(e)前記ゆがめられたFRINGE・パターンを結合することによって位相重ねイメージを生成する段階と、(f)前記位相重ねイメージの重なり解除を行うことによって前記対象物の前記表面を再構築する段階とを包含することを特徴とする方法。

【請求項8】 請求項7に記載の、三次元表面輪郭を描画する方法において、少なくとも3つの移相FRINGE・パターンを120度ずつ分離して生成することを特徴とする方法。

【請求項9】 請求項7に記載の、三次元表面輪郭を描画する方法において、前記移相FRINGE・パターンの各々を順次に投影することを特徴とする方法。

【請求項10】 請求項7に記載の、三次元表面輪郭を描画する方法において、前記複数の移相FRINGE・パターンをカラー符号化してほぼ同時に投影することを特徴とする方法。

【請求項11】 幾何学的形状を構成している表面を有する対象物の三次元表面輪郭を描画する装置であって、複数のデジタル的に解釈可能な移相FRINGE・パターン信号を生成するFRINGE・パターン生成器であり、前記信号の各々を別々の位相角度で生成するFRINGE・パターン生成器と、このFRINGE・パターン生成器に接続してあり、前記信号を受け取り、光学FRINGE・パターンに変換し、それらを前記表面上へ投影し、前記FRINGE・パターンが前記対象物の前記幾何学的形状によってゆがめられるデジタル・ビデオ・プロジェクタと、前記ゆ

がめられたフリンジ・パターンの反射を検索する光学検索装置と、前記ゆがめられたフリンジ・パターンを結合し、前記対象物の前記表面を再構築するイメージ生成器とを包含することを特徴とする装置。

【請求項12】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、前記フリンジ・パターンを生成するように構成した回路であることを特徴とする装置。

【請求項13】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、前記イメージ生成器内に設置してあって、前記フリンジ・パターンを生成するようにプログラムした回路を包含することを特徴とする装置。

【請求項14】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、さらに、前記位相角度をシフトする機械的な移相器を包含することを特徴とする装置。

【請求項15】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記フリンジ・パターン生成器が、デジタル的に前記位相角度をシフトすることを特徴とする装置。

【請求項16】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記移相フリンジ・パターンの各々を順次に投影することを特徴とする装置。

【請求項17】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、前記複数の移相フリンジ・パターンをカラー符号化し、ほぼ同時に投影することを特徴とする装置。

【請求項18】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、120度分離した3つの移相フリンジ・パターンがあることを特徴とする装置。

【請求項19】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置において、多数の移相フリンジ・パターンがあり、これらの移相フリンジ・パターンが、その数で360度を割った商の分ずつ分離していることを特徴とする装置。

【請求項20】 請求項11に記載の、三次元表面輪郭を描画する装置にお

いて、さらに、輪郭描画速度を高めるべく前記イメージ生成器に前記フリンジ・パターン生成器を接続する同期化リンクを包含することを特徴とする装置。

**【発明の詳細な説明】****【0001】**

本願は、1997年12月31日に出願された合衆国仮出願60/070138の利益を主張する。

**【0002】**

(行政権の提示)

本発明は、全米科学財団によって与えられた認可番号DMI9713895の下に政府の援助でなされたものである。政府は、本発明に特定の権利を有する。

**【0003】**

(発明の背景)

本発明は、全般的に三次元表面輪郭描画のための方法と装置に関する。特に、本発明は、三次元表面輪郭描画においてデジタル的にフリンジ・パターンを生成するデジタル・ビデオ投影システムを使用する。

**【0004】**

三次元表面輪郭描画技術は、設計および製造に多くの用途を有する。たとえば、表面輪郭描画を用いて、製造中あるいは製造後に設計仕様について寸法および幾何的形狀をチェックする必要がある工業部品の点検を行うことができる。これらの技術は、また、或る物理的な部品からコンピュータ利用設計(CAD)モデルを構成する必要があるリバース・エンジニアリングにおいても使用できる。近年、階層化製造概念に基づく迅速な試作技術が確立されており、CADモデルから直接的に物理的概念のモデル、機能部品およびツーリングを迅速に製作することができる。表面輪郭描画技術は、CADモデルが利用できない手作りモデルまたは部品から物理的な部品、ツーリングを構築することを含むように現行迅速試作システムの能力を延ばす助けともなり得る。表面輪郭描画技術は、また、迅速試作プロセスにプロセス点検またはポスト・プロセス点検を導入することによって、構築されたモデルの精度を向上する助けともなり得る。

**【0005】**

多くの光学的三次元輪郭描画方法が開発されており、この技術分野では周知である。これらの方法は、一般的に、2つのグループに分類することができる。す

なわち、スキャン式と非スキャン式の像形成技術である (Bieman, Leonard H., "Survey of design considerations for 3-D imaging systems", Proc. SPIE, Vol. 1005, 138-144 (1998))。スキャン式技術は、ポイント三角測量法 (Blais, F. and Rioux, M., "BIRIS: a simple 3-D sensor", Proc. SPIE, Vol. 723, 235 (1986))、レーザ・レーダー法 (Svetkoff, D.J., Leonard, P.F., and Sampson, R.E., "Techniques for real-time, 3-D feature extraction using range information", Proc. SPIE, Vol. 521, 302 (1984))、構造化ライン法に代表される。ポイント三角測量法および構造化ライン法が三角測量原理に基づいているのに対し、レーダー法は、パルス化したレーザまたは変調したレーザのいずれかの移動時間または位相の測定に基づいている。これらの技術は、すべて、対象物の全表面をカバーするにはレーザの一次元または二次元のスキャニングを必要とする。これによれば、一般に、システムがより複雑となり、測定に時間がかかる。

#### 【0006】

代表的な非スキャン式技術としては、ステレオ・ヴィジョン法とモアレ干渉法がある。ステレオ・ヴィジョン法は、2つの異なったパースから1つのシーンを見て、次いで両方のイメージに共通の特徴を置くことによって対象物の三次元情報を得る。(Hobrough, G. and Hobrough, T., "Stereopsis for robots by iterative stereo image matching", Proc. SPIE, Vol. 449, 62 (1983))。画像処理はコンピュータ的には強烈なものであり、高速三次元輪郭描画には不適である。

#### 【0007】

モアレ干渉法は、三次元表面輪郭描画のために最も普通に用いられている技術の1つである。他の技術と比較して、このモアレ干渉法は、対象物全表面をカバーするようにスキャニングする必要がなく、三次元輪郭情報を抽出する画像処理が比較的単純であるという事実により、測定が高速で行えるという主要な利点を有する。モアレ輪郭描画技術は、シャドウ・モアレ (Chiang, F. P., "Moire Methods for Contouring, Displacement, Deflection, Slope, and Curvature", Proc. SPIE, Vol. 153, 113-119 (1978)) と、投影モアレ (Khetan, R. P. and F. P. Chiang, "On the theory of two projection moire methods", Univ. Of I

11, at Chicago press, 8, 16-18 (1977); Halioua, M., Krishnamurthy, R. S., Liu, H., and Chiang, F. P., "Projection moire with moving gratings for automated 3-D topography", Appl. Opt. 22, 850-855 (1983) とに分類できる。シャドウ・モアレが照明、観察の両方に対して同じ格子を使用するのに対し、投影モアレは別々の格子を使用する。別の表面輪郭描画技術としては、1つの格子だけを使用し、三角測量によって表面高さを測定するフリンジ投影がある。

#### 【0008】

シャドウ・モアレの利点は、格子が平らであり、その周期が既知であるため、モアレ・パターンから量的輪郭情報を得るのが容易であるということである。しかしながら、大きな対象物の輪郭描画はむずかしい。というのは、対象物とほぼ同じサイズを有する格子を使用しなければならないからである。大きい格子は作るのが困難であるし、モビリティの点で制限がある。

#### 【0009】

投影モアレ法およびフリンジ投影法は、大きい対象物を輪郭描画できるという点ならびに測定解像度を高めるように位相測定技術を容易に実行できるという点で有利である。これらの方法の主たる限界は、量的高さ情報を得ることに伴う退屈さである。この限界は、投影幾何学形状および倍率ファクタの両方を較正する必要があるためにある。

#### 【0010】

輪郭描画解像度を高めるために、干渉計測定法において開発された移相技術が、三次元表面輪郭描画のためのモアレ法およびフリンジ投影方法において広く採用され、使用されてきた。モアレ、フリンジ投影輪郭描画法の解像度は、対象物に投影されるフリンジの密度に依存する。一般的には、高いフリンジ密度は高い解像度を意味する。しかしながら、あまりに密度の高いフリンジはカメラによって解像することができないので、適用し得るフリンジ密度には限界がある。このジレンマを解決するために、光学的輪郭描画用途において移相技術が開発され、広く使用されてきた (Halioua, M. and Liu, H. -C., "Optical Three-Dimensional Sensing by Phase Measuring Profilometry", Opt. Lasers Eng., 11(3), 185-215 (1989); Moore, D.T. and Truax, B.E., "Phase-Locked Moire Fringe A



analysis for Automated Contouring of Diffuse Surfaces", Appl. Opt., 18(1), 91-96 (1979); Srinivasan, V. H., Liu, H. -C., and Halioua, M., "Automated Phase-Measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects", Appl. Opt., 23(18), 3015-3018 (1984); Srinivasan, V. H., Liu, H. -C., and Halioua, M., "Automated Phase-Measuring Profilometry of 3-D Diffuse Objects", Appl. Opt., 24(2), 185-188 (1985); Boehnlein, A.J. and Harding, K.G., "Adaptation of a Parallel Architecture Computer to Phase Shifted Moire Interferometry", Proc. SPIE, Vol. 728, 183-193 (1986); Kujawinska, M., "Use of Phase-Stepping Automatic Fringe Analysis in Moire Interferometry", Appl. Opt. 26(22), 4712-4714 (1987); Toyooka, S. and Iwaasa, Y., "Automatic Profilometry of 3-D Diffuse Objects by Spatial Phase Detection", Appl. Opt., 25(10), 1630-1633 (1986)。移相は、高密度フリンジの使用を必要とせず、測定解像度を劇的に高める。普通の移相は、一連の移相フリンジ・パターンを創り出すのに機械的に格子を変位させることによって行われる。移相フリンジ・パターンは、次に、この技術分野では周知のアルゴリズムを使用して、イメージの各ピクセルの位相を抽出するように処理される。

#### 【0011】

移相イメージは、一般に、格子を機械的に並進させることによって得られる。欠点は、システムへの可動部品の導入のためにシステムが複雑になり、そして、機械的なエラーにより移相が不正確になる可能性があるということである。従来の移相技術に伴う問題のいくつかを除くために、移相・論理モアレ (PSALM) 法が提案された (Asundi, A., "Projection moire using PSALM", Proc. SPIE, Vol. 1554B, 257-265 (1991))。PSALM法は1つの格子だけを使用し、他の格子はコンピュータ内のソフトウェアによって生成される。移相済みのモアレ・フリンジは、対象物のイメージおよびソフトウェア生成格子についての論理計算から得られる。可動部品がまったく不要なので、この技術は輪郭描画システムをかなり単純化する。この技術に伴う問題は、輪郭描画結果が表面反射率変化および既存の表面マークのためにエラーを含みやすいということにある。輪郭描画システムを単純化する他の試みとしては、投影システムとして液晶ディスプレイ

プレイ (LCD) パネルを使用することがある (Asundi, A., "Fringe Analysis in Moire Interferometry", Proc. SPIE, Vol. 1554B, 472-480 (1991); Arai, Yasuhiko, Yekozeki, Shunsuke, and Yamada, Tomoharu, "3-D automatic precision measurement system by liquid crystal plate on moire-topography", Proc. SPIE, Vol. 1554B, 266-274 (1991))。フリンジ・パターンの生成および移相をソフトウェアによって行う場合、システムが融通的となり、単純となる。しかしながら、LCDパネルのイメージ輝度、コントラストが低いために (Sansoni, G., Docchio F., Minoni U., and Bussolati C., "Development and characterization of a liquid crystal projection unit for adaptive structured illumination", Proc. SPIE, 1614, 78-86 (1991))、対象物から反射してきたフリンジ・パターンの品質が劣っており、表面輪郭情報を抽出する際にエラーが生じる。この理由のために、任意意味のある輪郭描画は小さい対象物についてしか行われない。

#### 【0012】

移相技術に関連した他の伝統的な問題は、 $-\pi/2$ と $\pi/2$ の間の値のみを有するアーク・タンジェント関数を使用する位相抽出プロセスによって生じるモジュロ $2\pi$ 曖昧性である。訂正を行っても、位相算出範囲は $0 \sim 2\pi$ まで広がり得るが、絶対位相はまだ発見され得ない。このことは、対象物表面が不連続な特徴を有する場合、たとえば、階段状のジャンプを有する場合で、高さ変化によって $2\pi$ を上回る位相変化が生じる場合、位相抽出プロセスは正しい高さ情報を提供することができないことを意味する。したがって、従来の移相技術は、通常、不連続な幾何学的形状の特徴を有する表面を測定するのには適用できない。この問題を除くために、新しい技術、すなわち、フィールド・シフト・モアレ法が提案された (Boehnlein, Albert, and Harding, Kevin G., "Field shift moire, a new technique for absolute range measurement", Proc. SPIE, Vol. 1163, 2-9 (1989))。フィールド・シフト・モアレ法は、格子および光源を含めて投影システム全体をシフトして一連のフィールド・シフトされたイメージをキャプチャする。適正な数学的な操作によれば、フリンジ順序および各ピクセルの位相の両方が抽出され、不連続な特徴を有するプリズム対象物の場合でも、表面輪郭の絶

対測定値を生成することができる。しかしながら、問題は、正確な段階を踏んで投影システム全体をシフトする必要があるということである。この場合、従来の格子シフト操作技術よりもシステムがかなり複雑となる。

#### 【0013】

移相を使用するとき、少なくとも3つのイメージ（各々、必然的に移相がある）を採用して対象物の輪郭を再構築しなければならない。伝統的に、これらの移相イメージは逐次的に採用され、これが技術を静止対象物の輪郭描画だけに限定する。多くの工学技術用途において、準安定状態または動的な変化の下にある対象物の三次元表面輪郭描画は、対象物に関する極めて重要な情報を提供する。このような用途においては、対象物の三次元表面輪郭を迅速にキャプチャすることが必要になる。解像度をそのままに保ちながら輪郭描画速度をブーストする手段としてカラーを使用することについてのいくつかのレポートがこれまでにあった。K.G. Harding "Color encoded moire contouring", SPIE Proc. Vol. 1005 Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision III, 169-178 (1988)およびヨーロッパ特許EP0076866である。Hardingは、カラー符号化されたフリンジ・パターンによって照明された対象物のただ1回のスナップ・ショットから対象物の三次元表面輪郭を検索するカラー符号化式モアレ技術を提案している。輪郭描画速度は、カメラのフレーム率だけによって制限される。しかしながら、Polaroidフィルムで生成されたカラー符号化されたフリンジ・パターンのコントラスト比が劣っていたので、実際の対象物輪郭描画はまったく試みられなかった。

#### 【0014】

ヨーロッパ特許EP0076866は、互いに相対的に120度ずつ移相されているパターンを有する対象物上に3つのカラー符号化されたパターンを同時に投影することを開示している。対象物表面によって変形させられた格子パターンは、3台の関連したカラー感度カメラによって、これらのカラー符号化に対応して記録される。この結果として、パターンが3つの異なった位相関係で同時に記録され、機械的なシフト操作を必要とせずに移相アルゴリズムに基づく評価を実施することができる。

## 【0015】

上記の方法および装置の各々は、三次元像形成において使用できないという固有の欠点を有する。本発明の一目的は、このような欠点を克服し、三次元表面輪郭描画のための改良した方法および装置を提供することにある。

## 【0016】

## (発明の概要)

本発明は、三次元表面輪郭描画のための方法および装置である。本発明は、表面輪郭描画においてフリンジ・パターンを投影するデジタル・ビデオ・プロジェクタを使用する。

## 【0017】

幾何学的形状を構成している表面を有する対象物の三次元表面輪郭を描画する方法は、複数のデジタル的に解釈可能な移相フリンジ・パターン信号を生成することを包含し、各信号は、別々の位相角度で生成される。次に、信号は、対象物の表面上へ投影される光学的に移相されたフリンジ・パターンに変換される。対象物の幾何学的形状は、フリンジ・パターンをゆがめる。各ゆがめられたフリンジ・パターンの反射が、個々に検索される。ゆがめられたフリンジ・パターンは結合されて位相重ねイメージを生成する。位相重ねイメージは、対象物の表面を再構築するように分離される。

## 【0018】

対象物の三次元表面輪郭を描画する装置は、複数のデジタル的に解釈可能な移相フリンジ・パターン信号を生成し、各信号を別々の位相角度で発生するフリンジ・パターン生成器を包含する。デジタル・ビデオ・プロジェクタが、フリンジ・パターン生成器から信号を受け取る。デジタル・ビデオ・プロジェクタは、これらの信号を光学フリンジ・パターンに変換し、対象物の表面へフリンジ・パターンを投影する。フリンジ・パターンは、対象物の幾何学的形状によってゆがめられ、光学検索装置がゆがめられたフリンジ・パターンの反射を検索する。イメージ生成器が、ゆがめられたフリンジ・パターンを結合し、対象物の表面を再構築する。

## 【0019】

本発明の好ましい実施例においては、少なくとも3つの移相フリンジ・パターンが、120度に分離してせいせいされる。移相フリンジ・パターンは、逐次的に投影され得る。好ましくは、移相フリンジ・パターンの逐次的投影は、輪郭描画速度を増大させるために同期化される。輪郭描画速度は、移相フリンジ・パターンをカラー符号化することによって、ほぼ同時に複数の移相フリンジ・パターンを投影することによっても高められ得る。フリンジ・パターン生成器は、フリンジ・パターンを生成するように構成した回路であってもよい。フリンジ・パターン生成器は、イメージ生成器内に設置してもよい。フリンジ・パターン生成器は、また、位相角度をシフトするための機械的な移相器を包含していてもよい。好ましくは、フリンジ・パターン生成器は、位相角度をデジタル的にシフトする。好ましくは、多数の移相フリンジ・パターンがある場合、移相フリンジ・パターンは、その数で360度を割った商ずつ分離される。本発明の結果として、三次元表面輪郭描画のための方法と装置は、提供される。

#### 【0020】

本発明の結果として、三次元表面輪郭描画の方法および装置が得られる。特別な利点は、フリンジ・パターンがデジタル的に生成され、デジタル・ビデオ・プロジェクタにより投影されるため、フリンジ・パターンが予想外に高い輝度およびコントラスト比を有するということである。それに加えて、フリンジ・パターンがデジタル的に生成されるので、任意の横断面輝度プロファイル、間隔を有するフリンジを生成できる。さらに、このデジタル的に制御される移相技術は、より高い輪郭描画精度に変換する格子あるいは他の光学的成分を物理的にシフトする従来からの必要性を除く。さらに、こうして、フリンジ・パターンを種々の用途のためにカラー符号化するのが容易になる。

#### 【0021】

本発明のより良く理解して貰うために、以下、添付図面に関連して行う以下の説明を参照されたい。発明の範囲は添付の特許請求の範囲に記載する。

#### 【0022】

本発明の好ましい実施例が説明のために選んであり、添付図面に示してある。

#### 【0023】

## (発明の詳細な説明)

まず図1を参照して、ここには、本発明による表面輪郭描画装置10が示してある。表面輪郭描画装置10は、フリンジ・パターン生成器16、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18、光学検索装置20、イメージ生成器22を包含する。

## 【0024】

フリンジ・パターン生成器16は、デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成し、このデジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号をデジタル・ビデオ・プロジェクタ18が受け取って光学フリンジ・パターンへ変換する。フリンジ・パターン生成器16は、この技術分野で知られているような正弦波パターン、バイナリ構造化ライン・パターンおよび円形パターンを含む任意タイプの光学フリンジ・パターンを生成するようにデジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を生成することができる。最も重要な点として、フリンジ・パターン生成器16は、複数のデジタル的に解釈可能な移相フリンジ・パターン信号を生成し、位相角度をデジタル的にシフトすることによって格子を機械的にシフトする従来の方法を使用することなく、複数の光学移相フリンジ・パターンを生成することができるのである。たとえば、フリンジ・パターン生成器16は、任意適当なコンピュータ、プロセッサ（たとえば、デジタル信号プロセッサ、マイクロプロセッサなど）、マイクロコントローラまたはここでの教示に従って較正した回路であってもよい。フリンジ・パターン生成器16としてコンピュータを使用して本発明者等が行った実験において、本発明者等は、コンピュータで信号を生成するための、Visual Basicで、また、Visual C++でウィンドウズベース・プログラムを開発した。この実験では、本発明者等は、フリンジ・タイプ、輝度プロファイル、間隔、位相およびカラーを修正するためのインタフェースとして、キーボードおよびビデオ・モニタを使用した。フリンジ・パターン生成器は、特殊な工業用途に仕立てた組み込み回路も使用できる。

## 【0025】

次に図2を参照して、ここには、フリンジ・パターン生成器16で使用するアルゴリズムを説明するフローチャートが示してある。本質的に、フリンジ・パターン生成器16は、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18の各ピクセルにたいし

て輝度 ( $I$ ) およびカラーを割り当てる。入力ブロック 23 を参照して、最初に、位相角度  $\Delta$ 、ピッチ  $p$ 、カラー、そして、フリンジ・パターンを投影するためのデジタル・ビデオ・プロジェクタのピクセル・アレイ  $m \times n$  を選ぶ。フリンジ・パターンのカラー符号化が要求される場合、輝度は、ブロック 25 に示すように決定する。ここにおいては、 $I_r(x)$ 、 $I_g(x)$ 、 $I_b(x)$  は、ピクセルの各ラインまたは円に割り当てられたレッド、グリーン、ブルーの輝度である。ここで、 $I_r(x)$ 、 $I_g(x)$ 、 $I_b(x)$  が各々  $2\pi/3$  または  $120$  度ずつ移相されていることに注目されたい。正弦波フリンジ・パターンについての数式が、他の輝度プロファイルを有するフリンジ・パターン、たとえば、三角形のフリンジ・パターンも同様に使用できるので、ブロック 25 にほんの一例として示してある。ただ 1 つのカラー・フリンジ・パターンを生成しようとしている場合には、輝度プロファイルが次に決定される。ここで再び、ほんの一例として、ブロック 27、29、31 は、それぞれ、正弦波、三角形、バイナリの輝度プロファイルのための数式を含んでいる。これらの数式は、当業者が普通に使用しているものである。ブロック 33、35、37 は、それぞれ、レッド、グレイスケール、グリーンのフリンジ・パターンを生成する例を示している。他のカラーのフリンジ・パターンは、同様の方法で生成することができる。フリンジ・タイプが次に選ばれる。ブロック 39、41 に示すように、フリンジ・パターンは、一般的には線形あるいは円形であるが、任意所望の形で配置することもできる。各ピクセルに輝度およびカラーを割り当てるプロセスは、アレイ  $m \times n$  が完成するまで繰り返される。

#### 【0026】

上述したようにフリンジ・パターン生成器 16 でデジタル的に移相を行うが好ましいが、本発明の別の実施例においては、装置は、さらに、位相角度をシフトする機械的な移相器を包含してもよい。従来の機械的移相器は、一般的に、像形成されつつある格子または対象物を並進させたり、投影されたフリンジ・パターンを屈折させるガラス製のプレートを回転させたりするのにモータを包含する。機械的移相器の例は、Hallioui 等の米国特許第 4,641,972 号、Lange の米国特許第 4,984,893 号および Huber 等の米国特許第 5,561,526 号に見出される。これらの米国特許は、参考資料として、ここに援用する。

## 【0027】

次に図1を参照して、ここに示すデジタル・ビデオ・プロジェクタ18は、フリンジ・パターン生成器16によって生成されたデジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を受け取り、この信号を光学フリンジ・パターンに変換し、それを対象物12の表面14上へ投影する。移相フリンジ・パターンの例が、図6A、6Bおよび6Cに示してある。これらの移相フリンジ・パターンは、それぞれ、0度、120度および-120度の位相角度を有する。投影されたフリンジ・パターンは、次に、対象物12の幾何学的形状によってゆがめられる。好ましくは、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18は、Texas Instruments Incorporatedによって最近開発された「デジタル・マイクロミラー装置(DMD)でのデジタル光処理(DLP)技術」を使用する。(Gove, R.J., "DMD Display Systems: The Impact of an All-Digital Display", Society for Information Display International Symposium (1994); Hornbeck, Larry, J., "Deformable-Mirror Spatial Light Modulators", Proc. SPIE, Vol. 1150 (1989); Hornbeck, Larry, J., "Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television applications", IEDM 15.1.1 (1993); Hornbeck, Larry, J., "Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future", available at <http://www.ti.com> (1996); Monk, D., "Digital Micromirror Device Technology for Projection Displays", EID Exhibition & Conference (Sandown, UK 1994); Sampbell, J.B., "The digital micromirror device", Proceedings of the 7th ICSS&A (Yokohama, Japan 1993); Sampbell, J.B., "An Overview of the performance Envelope of Digital Micromirror Device Based projection Displays", SID Digest, 669-672 (1994); and Younse, J.M., "Mirror on a chip, IEEE Spectrum. 30(11), 27 (1993))。これらの文献は、すべて、参考資料としてここに援用する。「デジタル・マイクロミラー装置(DMD)でのデジタル光処理(DLP)技術」は、三次元表面像形成において使用されるとき、高い輝度、コントラスト比および画質の利点を提供する。図3～5を参照しながらDLP技術を以下に簡単に説明する。

## 【0028】



次に図3を参照して、ここに示すデジタル・マイクロミラー装置(DMD)24は、小さい正方形のアルミニウム製ピクセル・ミラー26のアレイからなる上面を有するデジタル光スイッチ集積回路である。DMD24の各ピクセル・ミラー26は、図4に示すように、投影レンズ28のアパーチャの内外へ入射光を反射するようにデジタル的に制御され得る。「Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future」から採用した図4は、ミラーの光学切り替え作用を説明している。ピクセル・ミラー26がそのオン状態、すなわち、+10度に回転すると、照明器32からの光30が投影レンズ28内へ向けられ、ピクセル34が投影スクリーン36上に明るく現れる。ピクセル・ミラー26がそのオフ状態、すなわち、-10度に回転すると、照明器32からの光30は投影レンズ28から離れる方向に向けられ、ピクセル34が暗く見える。各ピクセル・ミラー26は、1秒当たり1,400回より多い回数で切り替えることができる。そして、投影レンズ28の内外への急速な光方向付けを行う256個のグレイ・レベルの可能性を生じる。

#### 【0029】

また「Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future」から採用した図5を次に参照して、ここには、代表的なDLP投影システム38の一例が示してある。DLP投影システム38は、好ましくはメタルハライドランプである照明器32を包含する。照明器32は、光を収集し、回転カラー・ホイール42上で光を像形成するコンデンサ・レンズ40を通過する白色光を発生する。カラー・ホイール42は、一般に、少なくともレッド、グリーン、ブルーの部分に分割してあり、これらのカラー部分を使用してカラー化した光の成分を投影し、16,000,000個のカラーを発生することができる。第2レンズ44が、カラー・ホイール42を通過する光を集め、DMD24の表面を均一に照らす。DLP回路基板46によって制御されるDMD24の各ピクセル・ミラー26の回転状態(+10度または-10度)に応じて、光は投影レンズ28内へあるいはそこから離れる方向へ向けられる。次に、投影レンズ28が投影スクリーン36上へ拡大イメージを投影する。DLP技術を使用する様々なデジタル・ビデオ・プロジェクタ18が現在市販されている。製造業者のい

くつかは、Davis North America, Inc、NEC Technologies Inc.、CTX Opto Inc.、In Focus Systemsである。ここに記載する実験においては、本発明者等は、In Focus Systems, Wilsonville, Oregonによって製造されたLitePro 620を使用した。

#### 【0030】

次に図1を参照して、ここに示す光学検索装置20は、対象物12の表面からのゆがめられたフリンジ・パターンの反射を検索する。光学検索装置20は、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18と異なった角度で、対象物12の表面14に対して合焦され、ゆがめられたフリンジ・パターンの反射を検索する。光学検索装置20は、任意の電子カメラでよい。たとえば、CCD、CMOSまたはビデオン・カメラまたはフィルムであってよい。好ましくは、光学検索装置20は、電荷結合素子(CCD)である。ここでの教示に従って使用するのに適したカメラは、同時に4,000,000を超えるデータ・ポイントの測定を行える2029(H)×2048(V)ピクセルの電荷結合素子アレイを有するKodak Megaplex Model 4.2iである。

#### 【0031】

イメージ生成器22は、ゆがめられた移相フリンジ・パターンを結合し、対象物12の表面14を再構築する。たとえば、イメージ生成器22は、任意適当なコンピュータ、プロセッサ(たとえば、デジタル信号プロセッサ、マイクロプロセッサ等)、マイクロコントローラまたはここでの教示に従って構成した回路であり得る。図1に仮想線で示すように、イメージ生成器22およびフリンジ・パターン生成器16は同じハウジング内に、たとえば、コンピュータ内に設置し得る。対象物の表面の再構築は、移相干渉計測定法から知られる従来のアルゴリズムのうちの任意のものを使用し、まず、移相フリンジ・パターンからの情報を結合して位相重ねイメージを獲得し、次いで、位相重ねイメージを分解し、対象物12の表面14を再構築することによって行われる。図6A、6Bおよび6Cに示す移相イメージから生成した位相重ねイメージの一例が図8に示してある。

#### 【0032】

まず、イメージ生成器22は、生成しようとしているイメージの各ピクセルの

位相を抽出する。この移相を得るためのアルゴリズムは、種々のものがこの技術分野では周知である。このようなアルゴリズムとしては、3ステップ・アルゴリズム (Gallagher, J. E. and Herriott, D.R., "Wavefront measurement", U.S. Patent 3,694,088 (1972); Creath, K. "Phase-Measurement Interferometry Techniques", in Progress in Optics. Vol XXVI, E. Wolf, Ed., Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988, pp. 349-393)、4ステップ最小二乗法アルゴリズム (Bruning, J. H., Herriott, D.R.; Gallagher, J.E., Rosenfeld, D. P., White, A. D., and Brangaccio, D. J., "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses", Appl. Opt., 13, 2693 (1974); Greivenkamp, J. E., "Generalized Data Reduction for Heterodyne Interferometry", Opt. Eng., 23, 350 (1984))、Carre法アルゴリズム (Carre, P., "Installation et Utilization du Comparateur Photoelectrique et Interferentiel du Bureau International des Poids de Mesures", Metrologia 2, 13 (1996))、平均化3+3アルゴリズム (Schwider, J. Burow, R., Elssner, K. E., Grzanna, J., Spolaczyk, R., and Merkel K., "Digital Wavefront Measuring Interferometry: Some Systematic Error Sources", Appl. Opt., 22, 3421 (1983); Wyant, J.C. and Prettyjohns, K. N., "Optical Profiler Using Improved Phase-Shifting Interferometry", U.S. Pat. 4,639,139 (1987))、Hariharan法アルゴリズム (Hariharan. P., Oreb, B. F., and Eiju, T., "Digital Phase-Shifting Interferometry: A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm", Appl. Opt., 26, 2504 (1987)、2+1アルゴリズム (Angel, J. R. P. and Wizinowich, P. L., "A Method of Phase-Shifting in the Presence of Vibration", European Southern Observatory Conf. Proc., 30, 561 (1988); Wizinowich, P. L., "System for Phase-Shifting Interferometry in the Presence of Vibration", Proc. SPIE, 1164, 25 (1989); Wizinowich, P. L., "Phase-Shifting Interferometry in the Presence of Vibration: A New Algorithm and System", Appl. Opt., 29, 3271 (1990)) がある。位相角度を得るための上述の文献は、参考資料としてここに援用する。

3ステップ・アルゴリズムにおいては、3つの移相パターンが生成され、各移相パターンは別々の位相角度で生成される。好ましくは、移相パターンは、120度 ( $2\pi/3$ ) ずつ分離している。 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ が別々の位相角度を表している場合、3つのパターンにおける各ピクセルの輝度は次のように表すことができる。

【0034】

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta_1]$$

(1)

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta_2]$$

(2)

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta_3]$$

(3)

ここで、 $I'(x, y)$ は平均輝度、 $I''(x, y)$ は輝度変調、 $\phi(x, y)$ は決定しようとしている位相である。 $\phi(x, y)$ について上記3つの式を同時に解くと、以下の解が得られる。

【0035】

$$\tan \phi(x, y) = \frac{(I_3 - I_2) \cos \Delta_1 + (I_1 - I_3) \cos \Delta_2 + (I_2 - I_1) \cos \Delta_3}{(I_3 - I_2) \sin \Delta_1 + (I_1 - I_3) \sin \Delta_2 + (I_2 - I_1) \sin \Delta_3}$$

(4A)

$\Delta_1 = -120$ 、 $\Delta_2 = 0$ および $\Delta_3 = 120$ と共に120度の移相( $\Delta$ )を使用することによって、式は次のように短縮できる。

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right)$$

(4B)

$(I_1 - I_3)$ および $(2I_2 - I_1 - I_3)$ のサインが既知の場合、上記の式は、各ピクセルのところでいわゆるモジュロ  $2\pi$  位相を与え、値が  $0 \sim 2\pi$  となる。ひとたび各ピ

クセルについて  $\phi(x, y)$  が決定されたならば、鋸歯状の位相重ねイメージを生成することができ、最高グレイ・レベルは  $2\pi$  の位相に対応し、最低のグレイ・レベルは 0 に対応する。3 つより多い移相パターンを生成し、各ピクセルについて  $\phi(x, y)$  を決定する際に使用することができる。一般に、これはより高い精度に通じる。しかしながら、このトレードオフは、イメージ検索、イメージ処理の両方において処理時間を長くする。それに加えて、平均輝度  $I'(x, y)$ 、輝度変調  $I''(x, y)$  およびデータ変調  $\gamma(x, y)$  は、次のようにして導くこともできる。

【0036】

$$I'(x, y) = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (5)$$

$$I''(x, y) = \frac{|3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2|^{1/2}}{3} \quad (6)$$

$$\gamma(x, y) = \frac{I''(x, y)}{I'(x, y)} = \frac{|3(I_1 - I_3)^2 + (2I_2 - I_1 - I_3)^2|^{1/2}}{I_1 + I_2 + I_3} \quad (7)$$

データ変調  $\gamma(x, y)$  は、各ピクセルのところでデータの品質を点検するのに使用できる。1 に近いデータ変調は良好であるが、ゼロに近いデータ変調は悪く、フリッジが洗い流されたか、飽和したか、焦点外れとなったか等を意味する。あるいは、Gallagher 等の米国特許第 3, 694, 088 号（参考資料としてここに援用する）に示唆されているように、位相、平均輝度、輝度変調およびデータ変調についての式 (1) ~ (3) の解をフーリエ係数によって決定してもよい。

【0037】

イメージ生成器 22 は、標準の位相重なり解除アルゴリズムを用いて位相重ねイメージから高さ情報を抽出する。位相重ねイメージの重なりを解除するためのアルゴリズムは、この技術分野では種々のものが周知である。位相重ねイメージの重なりを解くための一般的な方法が、"Phase Shifting Interferometry", in Optical Shop Testing, by J.E. Greivenkamp and J.H. Bruning, 2d Ed., Dani

el Malacara, John Wiley & Sons (1992) at pages 55 1-553に記載されている。それに加えて、Boehnlein等の米国特許第5, 307, 152号（参考資料として本願明細書で援用する）が、90度の移相を持って式（4A）で生成された位相重ねイメージの重なりを解くためのアルゴリズム（第7欄、第7行～第8欄、第43行）を開示している。

【0038】

本発明者等の行った実験においては、まず、 $2\pi$ 不連続性が次のようにして水平方向で除かれる。

$$f_x(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi k$$

(8)

ここで、 $k$ は、不連続性を除くために加える必要のある $2\pi$ の数である。数値 $k$ は、表面の幾何学的形状に応じて正ともなり、負ともなる。位相重ねイメージに式（8）を適用すると、高さとは無関係の一連の水平方向表面プロファイルが得られる。連続面を形成するためには、水平方向表面プロファイルの高さ関係を決定する必要がある。ピクセル数が $M \times N$ であると仮定するならば、これを行うために次のようにして中間列について垂直方向に $2\pi$ 不連続性を除く。

【0039】

$$f_y(M/2, y) = \phi(M/2, y) + 2\pi l$$

(9)

ここで、 $l$ は垂直方向に不連続性を除くために加える必要のある $2\pi$ の数である。中間列垂直方向プロファイルは、式（8）で生成した水平方向プロファイル列についての高さ関係を与える。最終的な表面輪郭は、以下の式によって得ることができる。

$$f(x, y) = [f_x(x, y) - f_x(M/2, y) - s_x x] + [f_y(M/2, y) - f_y(M/2, N/2) - s_y y]$$

(10)

ここで、

$$s_x = [f'_x(M, N/2) - f'_x(0, N/2)]/M$$

(11)

$$s_y = [f'_y(M/2, N) - f'_y(M/2, 0)]/N$$

(12)

は、それぞれ、中間行、中間列の勾配である。これらの勾配は、表面輪郭の傾きを除くためにこの式に含ませる。

【0040】

上記のアルゴリズムは、対象物がイメージ全体を占めていると仮定している。対象物が図6A、6B、6Cに示すようにイメージのほんの一部を占めているだけの場合、マスクを生成し、図7に示すようにバックグラウンドにあるノイズを除去して対象物の境界を定める。図7におけるマスクは、3の反射してきた移相フリンジ・パターンの平均をとり、この平均値を20のグレイ・レベルで二値化することによって生成された。このアルゴリズムは、対象物の境界内だけで位相の重なりを解くように修正される。

【0041】

以下、ダミー面の再構築を示している図6A、6B、6C、7、8を参照しながら、図1に示す本発明の実施例の動作を本発明の方法と一緒に説明する。まず、デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号を、フリンジ・パターン生成器16で生成する。この信号を、光学移相フリンジ・パターンに変換してから、図6Aに示すように像形成されつつある対象物12の表面14上へ投影する。フリンジ・パターンは、対象物の幾何学的形状によってゆがめられる。そして、このゆがめられたフリンジ・パターンの反射が光学検索装置20によって検索され、光学検索装置20がこの反射をイメージ生成器22に転送する。光学検索装置20が反射を検索した後に位相角度がシフトされ、このプロセスが繰り返される。一般には、上記の3ステップ・アルゴリズムを使用するとき、全部で3つの移相信号が生成される。図6A、6B、6Cの位相角度は、120度ずつ分離している。イメージ生成器22は、上記の通りにイメージの各ピクセルの位相を抽出

することによって、ゆがめられたフリンジ・パターンを結合し、図8に示すように位相重ねイメージを生成する。図8に示す位相重ねイメージを生成する際、図7に示すように対象物の境界にマスクをかけることによって、バックグラウンドのノイズを除去した。ひとたび位相重ねイメージを生成したならば、イメージ生成器22は位相重ねイメージの重なりを解くことによって対象物12の表面14を再構築する。

#### 【0042】

本発明の別の実施例においては、移相フリンジ・パターンは、カラー符号化され、ほぼ同時に投影される。カラー符号化を使用している本発明者等の最初の実験は、1998年9月29日に発行されたSPIE Proceedings Vol. 3407, Paper No.: 3407-66, pp.477-482 entitled "Color-encoded fringe projection and phase shifting for 3D surface contouring"に記載されている。この文献の開示内容は、参考資料として、本願明細書に援用する。本発明のこの実施例は図10～13を参照しながら説明する。これらの図は、頭部のブラスタ・スカルプチャの三次元表面輪郭を再構築する際に生成されたイメージを示す。

#### 【0043】

次に図1を参照して、この本実施例においては、フリンジ・パターン生成器16は、ほぼ同時に、カラー符号化された複数のデジタル的に解釈可能な移相フリンジ・パターン信号を生成する。3ステップ・アルゴリズムを位相重ねするために使用するときには、3つの信号を生成するのが好ましい。信号は情報で符号化し、光学フリンジ・パターンが120度ずつ移相され、各々が別々のカラー、たとえば、レッド、グリーン、ブルーを有する。本質的には、フリンジ・パターン生成器16は、3つの重畳した移相パターンの情報を含む信号を生成するが、イメージ再構築のために別の移相を識別するためにカラー符号化する。

#### 【0044】

デジタル・ビデオ・プロジェクタ18は、重畳されたカラー符号化信号を受け取り、この信号をカラー符号化光学フリンジ・パターンに変換し、それを図10に示すように対象物の表面14上へ投影する。図10に示すフリンジ・パターンは、図11A、11B、11Cに示す3つの移相成分を含んでいる。現在市販され



ているデジタル・ビデオ・プロジェクタを使用する際、カラーは3の異なった機構によって加えられることが可能である。プロジェクタが図5を参照しながら先に説明したようなDMDチップを1つだけを有する場合、カラーは、回転RGBカラー・ホイールを使用して加えられる。2つのDMDチップを有するプロジェクタでは、1つのチップがレッド専用とし、他のチップはグリーン、ブルー専用とする。イエロー、マゼンタのフィルタを有するカラー・ホイールを用いて連続するレッド・ビームとグリーン、ブルー交互のビームを得ることができる。3チップ・プロジェクタでは、DMDチップは、レッド、グリーン、ブルー専用となる。予想通りに、3チップ・システムは最高の光効率を与えるが、また、最も高価でもある。3チップ・プロジェクタを使用する場合、図11A、11B、11Cに示す3つの移相成分は、実際に、同時に投影され得る。回転カラー・ホイールを使用するシングルチップ・プロジェクタを使用する場合には、3つの移相成分は同時に投影されるが、各成分は間欠的に投影される。間欠的投影は、回転カラー・ホイールを通過しつつある光に関して回転カラー・ホイールの位置に依存する。

#### 【0045】

カラー符号化されたフリンジ・パターンを使用する場合、光学検索装置20はカラー・カメラである。好ましくは、光学検索装置20は、各CCDを1つのカラー・チャンネルに専用とできるので、高解像度を提供している3CCDカラー・ビデオカメラである。光学検索装置は、図10に示す光学フリンジ・パターンの反射を検索する。本発明者等の実験においては、 $1152 \times 864$ ピクセルを有するKodakのデジタル・カメラ(Model DC210)を使用した。このカメラは、フィルタ・アレイ技術に基づいてカラー・イメージを生成し、ピクセルの50%がグリーンについて濾過し、25%をレッド、ブルー各々について濾過するカラーCCDセンサを有する。人間の目はグリーンに最も敏感であるから、レッドおよびブルーについてのピクセルよりもグリーンについて濾過されたピクセルが多くなっている。カメラによって検索された反射は、Kodak's Easy Pictureソフトウェアを使用してイメージ生成器22に転送した。

#### 【0046】

イメージ生成器22は、まず、図10に示す反射を図11A、11B、11Cに示すようにそのRGB成分に分離する。RGB成分を獲得した後、RGB成分を、上記の標準の移相重ね・重ね解除アルゴリズムによって結合するが、上述したようにカラー・カップリング、カラー輝度について修正を行う。本発明者等の実験においては、Aldus PhotoStyler画像処理ソフトウェアを使用して反射のRGB成分を分離した。以下に説明する修正は、本発明者等が実施した特殊な実験に関する。説明が明らかになるにつれて、当業者であれば、同様の修正が必要であるが、発明の特殊な用途に依存することになることを理解できるであろう。

#### 【0047】

カラー符号化技術が反射をRGB成分に分離するのに必要なので、輪郭描画の結果は分離の品質次第である。一般的に、すべてのカラー・カメラにおいて、レッド、グリーン、ブルーのチャネルのスペクトルは、通常、若干オーバーラップさせて、スペクトルでのカラー・ブラインド領域をなくしている。これは、3つの移相フリンジ・パターンの完全分離がありそうもないことを意味している。しかしながら、オーバーラップの程度が一定なので、撮像後にカップリングカップリング効果を補正することができる。3つのカラー・チャネル間でカップリング効果の程度を見つけるために実験を行った。この実験で使用したターゲットは、平らで白色塗装した発泡板であった。純粋なレッド・グリーン・ブルーのフリンジ・パターンを順次に投影する。各カラーについて、3つの移相イメージ( $-2\pi/3$ 、0、 $2\pi/3$ )を採用し、合計9つのイメージを得た。次に、これらのイメージをRGB成分に分離し、合計27のイメージを得た。これらのイメージから、各セットの移相イメージについて、式(6)に従って、輝度変調 $I''(x,y)$ を算出した。チャネル間の $I''(x,y)$ 値の比は、これらのチャネル間におけるカップリング効果の程度を示した。レッド、グリーンのチャネル間に強いカップリング効果があるが、グリーン、ブルーのチャネル間のカップリング効果はかなり弱いことがわかった。レッド、グリーンのチャネル間の強いカップリング効果は、2つのカラーのスペクトル・オーバーラップのみの原因とはなり得ない。プロジェクタおよびカメラによるカラーゆがみがこのオーバーラップの原因となった可能性がある。というのは、対象物に投影されたレッドまたはグリーンのフリンジ

・パターンをビデオ・モニタ上のフリンジ・パターンと比較したとき、カラーの差が見えたからである。このカップリング効果を補正するために、以下の式を使用して補正済みの輝度を算出した。

【0048】

$$I_{rc}(x, y) = [I_r(x, y) - aI_g(x, y)] / (1 - ab) + c$$

(13)

$$I_{gc}(x, y) = [I_g(x, y) - bI_r(x, y)] / (1 - ab) + c$$

(14)

$$I_{bc}(x, y) = I_b(x, y) + c$$

(15)

ここで、 $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 、 $I_b(x, y)$ はオリジナルの輝度であり、 $I_{rc}(x, y)$ 、 $I_{gc}(x, y)$ 、 $I_{bc}(x, y)$ はそれぞれレッド、グリーン、ブルーのチャンネルについての補正輝度であり、 $a$ および $b$ はレッド、グリーンのチャンネル間のカップリング効果を表しており、 $c$ は0～255の輝度値を保つのに必要なオフセット量である。グリーン、ブルーのチャンネル間のカップリング効果は無視した。実験の結果は、この補正手段がカップリング効果によって生じたエラーをかなり減らすことを示した。

【0049】

カラー・チャンネル間のカップリング効果に加えて、レッド、グリーン、ブルーのフリンジ・パターンのイメージ間の輝度アンバランス補正が必要となるかも知れない。実験においては、レッドが最も弱く、グリーンが最も強かった。3つのカラーについての入力輝度が同じ(255のレベル)であったので、このアンバランスは、大部分、赤色光が不足しているメタルハライドランプを使用したデジタル・ビデオ・プロジェクタによって生じたものである。このアンバランスを補正するために、3つのカラーについてのフリンジ・パターンの振幅を調整した。210に対するグリーン、ブルーのカラーについての振幅を210に変え、レッ

ド・カラーについての振幅を255に保ったとき、最良の結果を得られることがわかった。

#### 【0050】

要約すれば、カラー符号化を使用するとき、三次元輪郭を得るには対象物の一回の反射だけしか必要とせず、したがって、輪郭描画速度が向上する。図10は、上述したように3つのカラーについての振幅を調節した場合の、カラー符号化光学フリンジ・パターンの反射を示している。図11A、11B、11Cは、カップリング効果を補正する前に図10から抽出された3つの移相RGB成分を示している。図12は、カップリング効果補正後に生成した位相重ねイメージを示しており、図13は、図12に示す中央長方形内に囲まれた領域においてのみ重なりを解いた対象物の再構築三次元イメージを示している。

#### 【0051】

本発明の別の実施例においては、移相フリンジ・パターンの逐次投影を同期化して輪郭描画速度を高めている。同期化を行うために、図1に示す本発明の装置は、さらに、イメージ生成器22にフリンジ・パターン生成器16を接続する同期化リンク48を包含する。この同期化リンク48は、デジタル的に解釈可能なフリンジ・パターン信号の初期生成と、各々がめられたフリンジ・パターンの反射の検索との調整を行う接続手段に過ぎないものであってもよい。この接続手段は、ソフトウェア・ベースであってもよいし、フリンジ・パターン生成器16またはイメージ生成器22のいずれかの回路に組み込んだものであってもよい。

#### 【0052】

あるいは、図5に示すようにシングルDMDチップ・デジタル・プロジェクタ18の独特な動作原理を使用して同期化を制御してもよい。まず、カラー符号化した複数のデジタル的に解釈可能な移相フリンジ・パターン信号をフリンジ・パターン生成器16で生成する。デジタル・プロジェクタ18に送られたとき、このカラー符号化されたフリンジ・パターンのRGB成分は、60Hzの周波数で、逐次的に、そして、繰り返し投影されることになる。ここで再び図5を参照して、プロジェクタのカラー・ホイール42を外したならば、フリンジ・パターンのRGB成分は、実際に、グレイスケールで投影されることになる。イメージ検索

をこれら3つの成分フリンジ・パターンの投影と同期化することによって、対象物の3つの移相イメージが非常に短い期間で取り出され、したがって、三次元像形成速度をかなり向上させることができる。ビデオ率(30フレーム/秒)で三次元像形成を実現できるように三次元再構築速度を高めるために、ハードウェア・ベースの画像処理およびグラフィックス・ディスプレイを使用してもよい。

#### 【0053】

本発明は、また、像形成結果を表示したり、さらに検討したりするためにイメージ生成器22を出力装置に接続したり、あるいは、それを包含したりすることも意図している。より具体的に言えば、出力装置は、単に像形成の結果を表示するためのビデオ・モニタまたはプリンタを包含するものであってもよい。一方、本発明を製造中あるいは製造後に設計仕様に適っているかどうかをチェックする必要がある工業部品の点検に使用する品質管理用途においては、イメージを標準部品の数学的モデルと比較して製造された部品に欠陥があるかどうか決定することができる。それに加えて、工業部品が血管を持っていると決定されたときには、イメージ生成器22をフリンジ・パターン生成器16にリンクさせ、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18が情報を投影するように信号を生成することができる。欠陥に関する情報は、たとえば、欠陥の性質、程度、面積を含み得る。この情報は、種々のやり方で投影することもできる。すなわち、像形成されつつある部品上の欠陥の位置を投影すること、欠陥を説明するテキストを投影すること、対象物の表面にカラーを投影すること、そして、ユーザ定義の意味を有するアイコンを投影することである。本発明を点検目的のために使うことができる特殊な例としては、薄板金製造業がある。本発明は、また、種々の位置でクランプ止めした薄板金部品の組立プロセスでも使用できる。間違ったクランプ止め位置は薄板金部品に大きい変形を生じさせる原因となり得る。本発明によれば、クランプ止め後迅速に薄板金部品の変形を点検することができ、その結果を薄板金面に投影することができる。次いで、最適位置が決まるまでクランプ止め位置を貯節することができる。

#### 【0054】

本発明の別の実施例においては、光学投影フリンジ・パターンは、表面輪郭描

画を向上させるように最適化される。モアレ干渉法またはフリンジ投影法による表面輪郭描画においては、解像度は、一般的に、対象物表面から反射してきたフリンジ・パターンのフリンジ間隔、コントラストに依存する。反映してきたフリンジ・パターンにおけるフリンジ間隔およびコントラストが対象物の表面の勾配および反射率に依存するので、投影されたフリンジ・パターンの間隔およびコントラストが表面の状態に基づいて最適化され、最適化輪郭描画結果を達成するはずである。従来の方法においては、間隔およびコントラストは、像形成されつつある表面全体について1つの値を割り当てられる。本発明によれば、像形成されつつある対象物は、上述したように、最初に再構築され得る。次に、イメージ生成器22が、最初に再構築したイメージに基づいて最適フリンジ間隔、コントラストを決定し、フリンジ・パターン生成器16へのリンクを介してフリンジ・パターン信号を調整する。次いで、第2の再構築イメージを、調整済みのフリンジ・パターン信号を使用して得る。別の実施例では、イメージ生成器22は、まず、再構築イメージを複数の別々の領域に分割する。各領域は、最適表面輪郭描画のために類似したフリンジ・パターンを必要とするという点を特徴とする。次に、イメージ生成器22は、各領域にその最適のフリンジ間隔およびコントラストを割り当てる。第2再構築イメージを上記の通りに得る。別の実施例においては、イメージ生成器22は、まず、再構築イメージの複製を生成する。再構築イメージは、複数の別々の領域に分割する。各領域は、最適表面輪郭描画のために類似したフリンジ間隔を必要とするという点を特徴とする。再構築イメージの複製は、複数の別々の領域に分割する。各領域は、最適表面輪郭描画のために類似したフリンジ・コントラストを必要とするという点を特徴とする。次いで、イメージ生成器22は、これらの結果を重畳し、表面全体にその最適なフリンジ間隔およびコントラストを割り当てる。第2の再構築イメージは上記の通りに得る。すべての実施例における最適化階段は必要に応じて繰り返し得るが、たいていの用途について繰り返しは一回だけでよいと考えられる。

#### 【0055】

本発明の別の実施例において、フリンジ・パターンは、対象物の表面にある不連続性と関連した問題を扱うように順序づけされる。1つの方法において、フリ

ンジ・パターンを投影する前に、単一のフリンジをデジタル的に投影し、対象物の表面を通してスキャンする。スキャン中、複数の反映イメージを検索し、不連続性を持つ領域の位置を決める。次に、表面の再構築を、上記の通りに本発明に従って行うが、1つのフリンジを、不連続性を持つとわかっている各領域を通じて異なったカラーまたは輝度で符号化する。符号化したフリンジは、こうして、残りのフリンジを順序づけるフリンジを参照するのに使用することができる。フリンジ順序からわかった付加的な情報は、位相の重なりを解く際に使用され、対象物の表面における任意の不連続性を正しく再構築する。別の方法において、フリンジ・パターンのフリンジは、すべて、虹に類似するフリンジ・パターンを形成する複数の異なったカラーでカラー符号化される。虹パターンは、十分な間隔で周期的に繰り返し、確実に類似したカラーのオーバーラップがなくなるようにすることができる。こうして、各フリンジは、対象物の表面における任意の不連続性が位相重なり解除中に正しく再構築され得るように、その虹色プロフィールを基礎として順序づけることができる。

#### 【0056】

対象物の表面における不連続性と関連した問題を扱う別の方法においては、まず、対象物の表面を通じて単一のフリンジを投影、スキャンすることによって獲得した複数の反映イメージから、この技術分野では知られている三角測量によって第1の表面輪郭を抽出する。各イメージには1つのイメージしか存在しないので、フリンジ順序の混乱もないし、モジュール  $2\pi$  曖昧性問題もない。三角測量から得た表面輪郭は正しいが、そのトレードオフは解像度が低くなるということである。次に、表面輪郭の高解像度を与える移相法を用いて第2の表面輪郭を得るが、表面不連続性で正しい高さ情報を抽出することができない。ひとたび両方の表面輪郭が得られたならば、イメージ生成器が両方のイメージからの情報を結合し、高解像度ならびに不連続部での正しい高さ情報を有する表面輪郭を得る。

#### 【0057】

本発明の別の実施例においては、フリンジ・パターン生成器16は、複数のデジタル的に解釈可能な信号を生成するように構成され、その結果、デジタル・ビデオ・プロジェクタ18は、対象物表面上の種々の部位に複数のスポットあるい

は十字カーソルを投影し、レンジ情報を決定する。このレンジ情報を決定する溜めに、まず、少なくとも3つのスポットまたは十字カーソルを対象物上の別々の部位へ投影する。スポットまたは十字カーソルの中心は、光学検索装置20で検索され、三角測量の原理を用いて、各部位までの距離をイメージ生成器22によって決定する。移相法によって得た表面形状と組み合わせた表面上の少なくとも3つの部位の距離情報は、スペース内の対象物表面の絶対的な位置、向き、形状を独自に決定する。この絶対的な位置、向き、形状の測定は、たとえば、異なった角度で測定した対象物表面のパッチを連結してシームレスな360度形状を形成する360度対象物表面測定を行う際に、有用である。

#### 【0058】

こうして、本発明の好ましい実施例であると現在考えられるものを説明してきたが、当業者であれば、発明の趣旨から逸脱することなく変更、修正をなし得るものであり、発明の真の範囲内に入るようなすべての変更、修正を本発明で請求していることは了解できよう。

#### 【図面の簡単な説明】

##### 【図1】

図1は、いくつかの属性を概略的に示した本発明の表面輪郭描画装置の斜視図である。

##### 【図2】

図2は、フリンジ・パターン生成器で用いられるアルゴリズムを示すフローチャートである。

##### 【図3】

図3は、デジタル・ミラー装置の立面図である。

##### 【図4】

図4は、デジタル・ミラー装置切り替え原理を説明する概略図である。

##### 【図5】

図5は、デジタル・ライト処理用投影システムを示す展開斜視図である。

##### 【図6A】

図6Aは、0度の位相角度を有するダミー面に投影されているフリンジ・パタ



ーンを示す図である。

【図6B】

図6Bは、120度の位相角度を有するダミー面に投影されているフリンジ・パターンを示す図である。

【図6C】

図6Cは、120度の位相角度を有するダミー面に投影されているフリンジ・パターンを示す図である。

【図7】

図7は、位相重ねイメージのバックグラウンドにおけるノイズを除去するように生成したマスクを示す図である。

【図8】

図8は、図6A、6Bおよび6Cに含まれる情報から生成された位相重ねイメージを示す図である。

【図9】

図9は、図6A、6Bおよび6Cに示すダミー面の再構築された表面を示す図である。

【図10】

図10は、プラスタ・ヘッド・スカルプチャ上へ投影されているカラー符号化フリンジ・パターンを示す図である。

【図11A】

図11Aは、-120度の位相角度を有する図10に示すカラー符号化フリンジ・パターンのレッド・チャンネルを示す図である。

【図11B】

図11Bは、0度の位相角度を有する図10に示すカラー符号化フリンジ・パターンのグリーン・チャンネルを示す図である。

【図11C】

図11Cは、120度の位相角度を有する図10に示すカラー符号化フリンジ・パターンのブルー・チャンネルを示す図である。

【図12】

図12は、図11A、11Bおよび11Cに含まれる情報から生成された位相重ねイメージを示す図である。

【図13】

図13は、図11A、11Bおよび11Cに示すプラスタ・ヘッド・スカルプチャの再構築された表面を示す図である。

【図1】

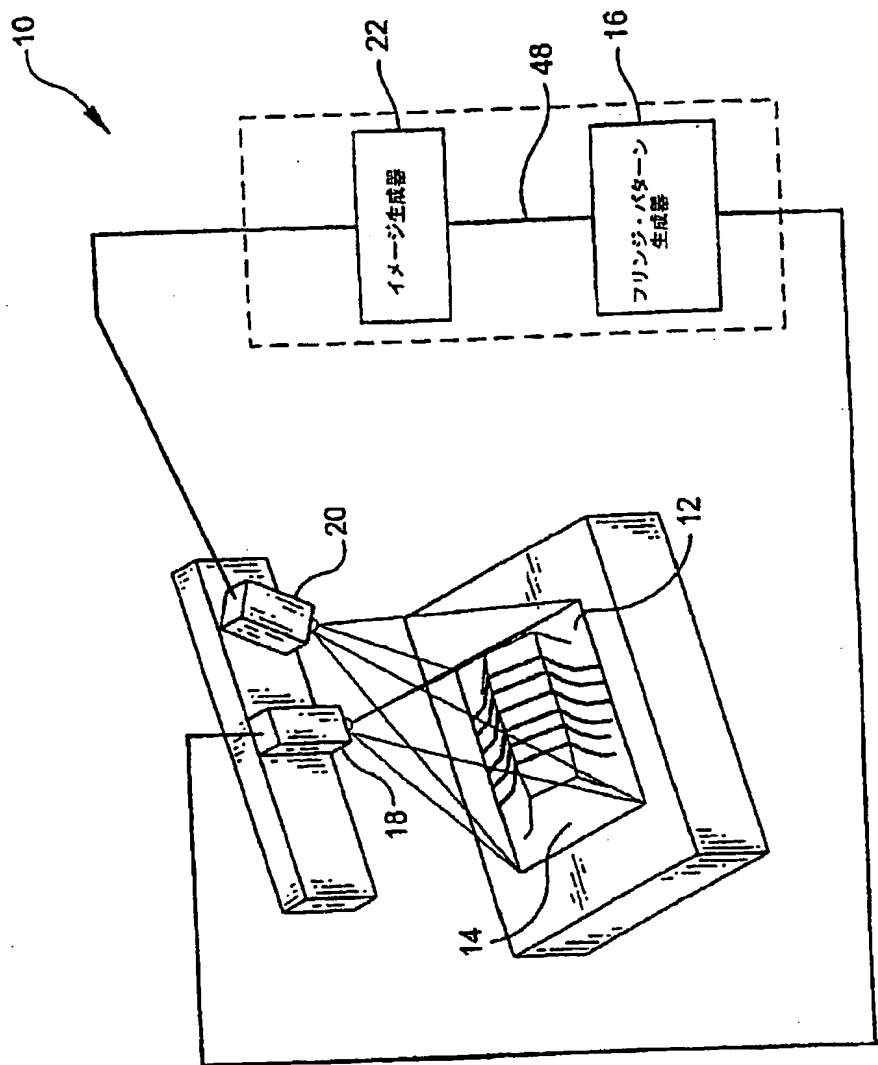
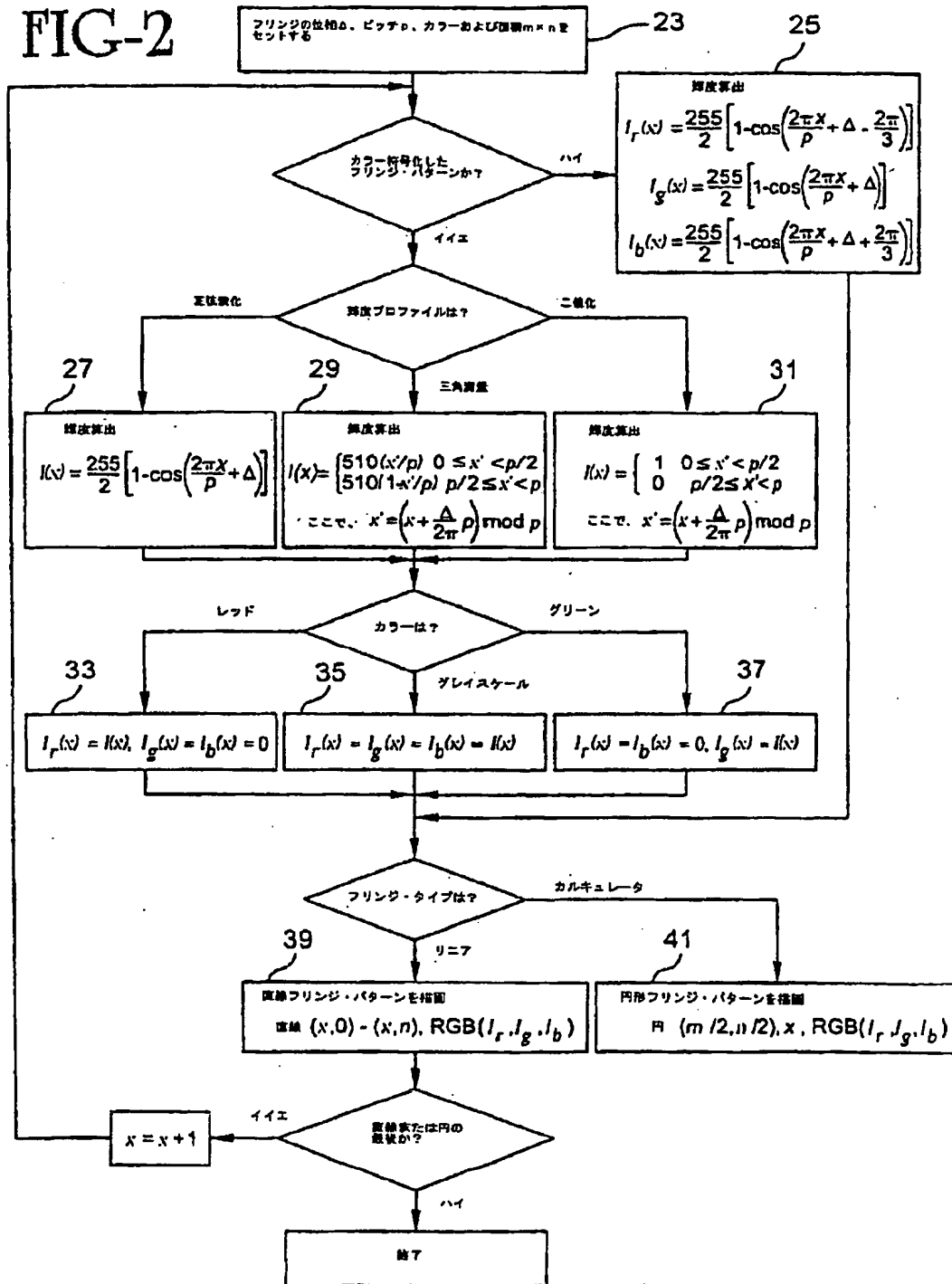


FIG-1

【図2】



【図3】

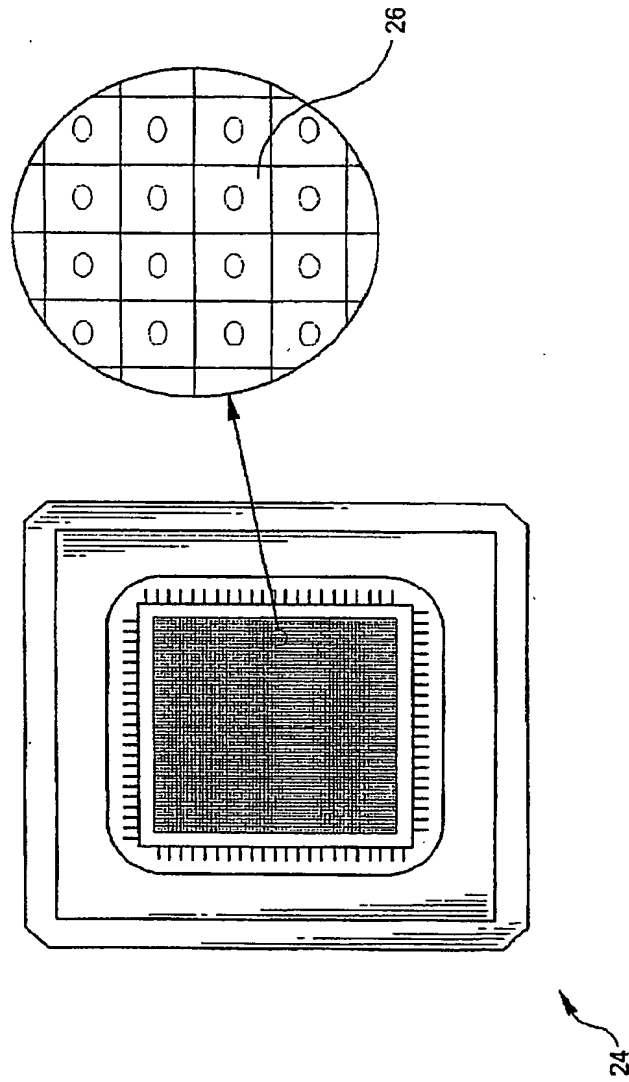
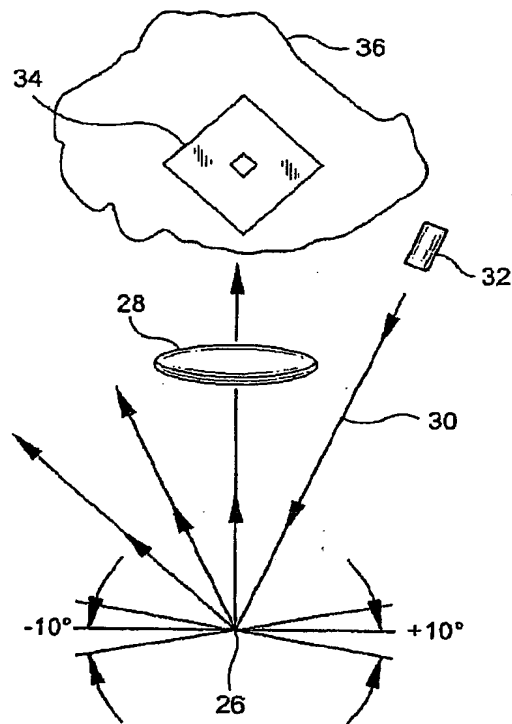


FIG-3

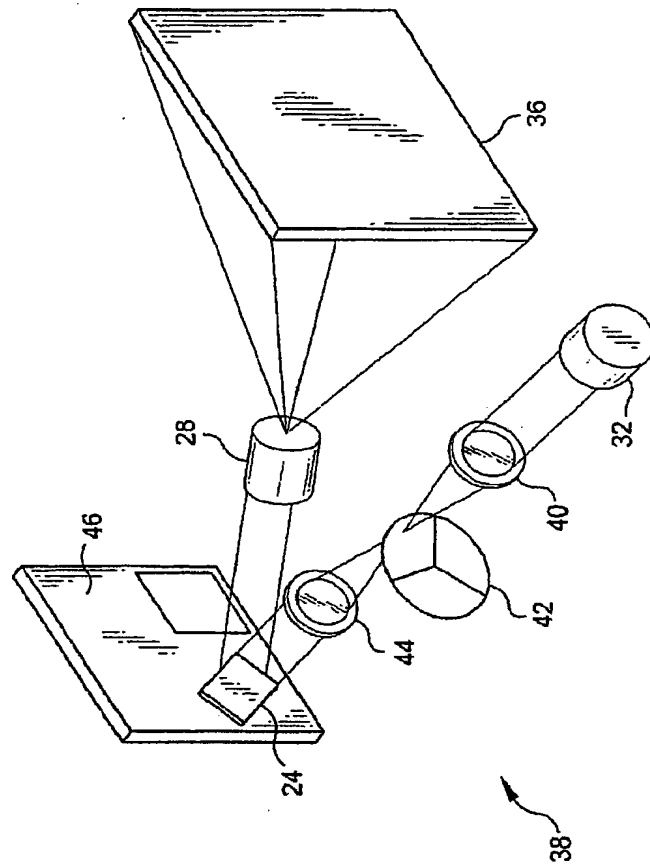
【図4】

FIG-4



【図5】

FIG-5



【図6A・B】

FIG-6B

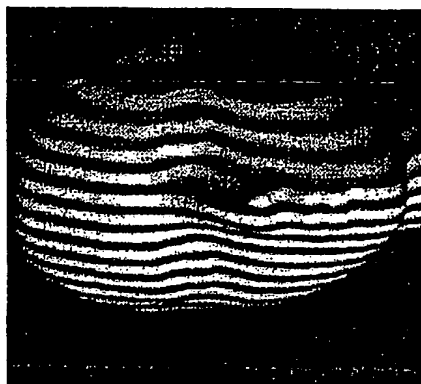
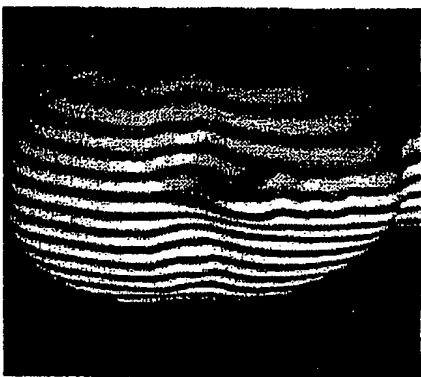
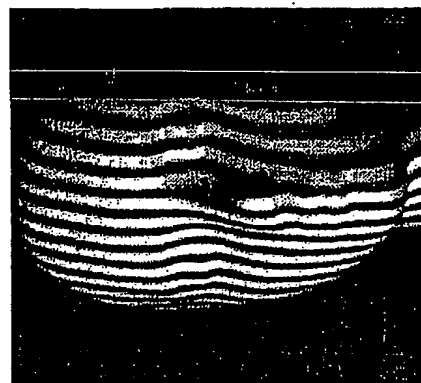


FIG-6A



【図6C】

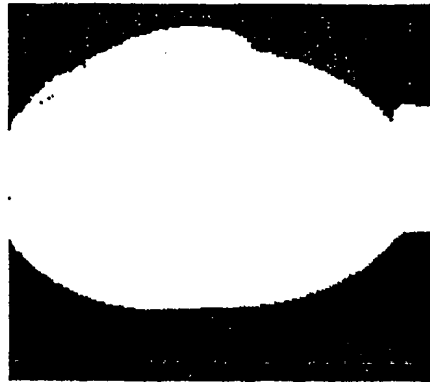
FIG-6C





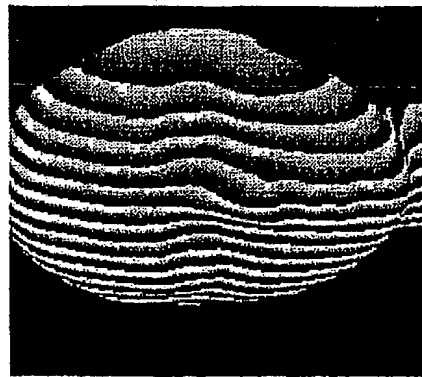
【図7】

FIG-7



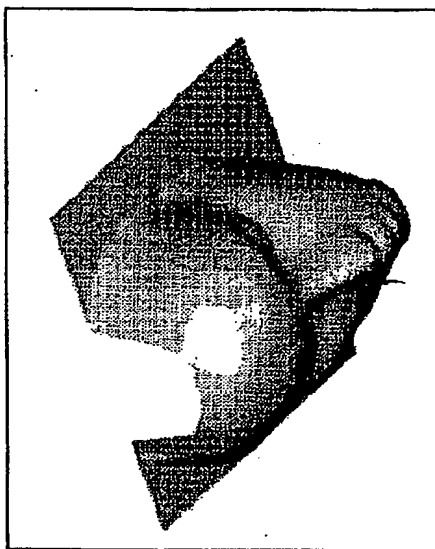
【図8】

FIG-8



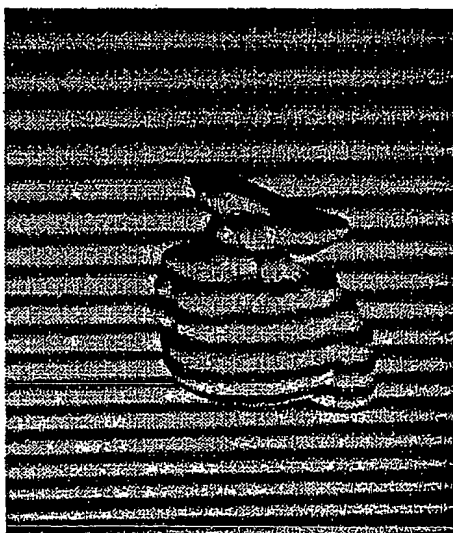
【図9】

FIG-9



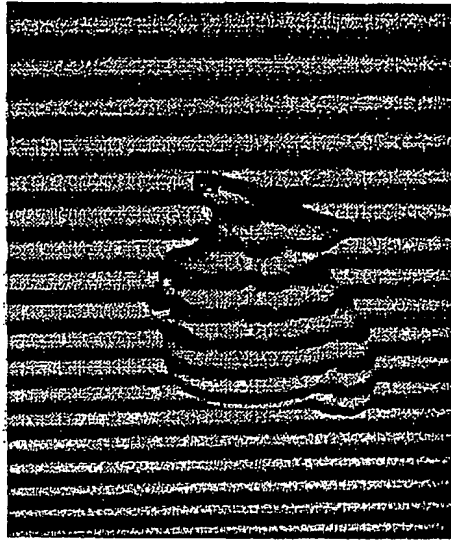
【図10】

FIG-10



【図11A】

FIG-11A



【図11B・C】

FIG-11C

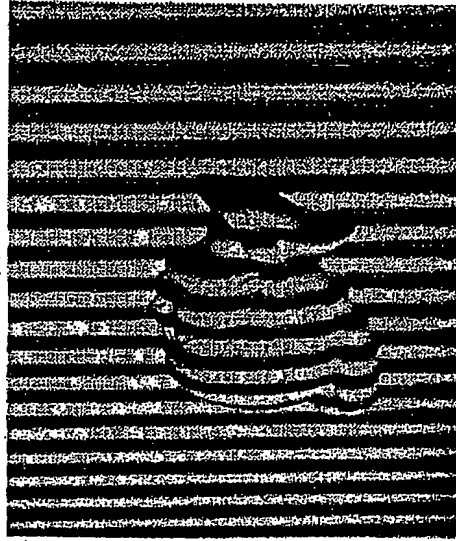
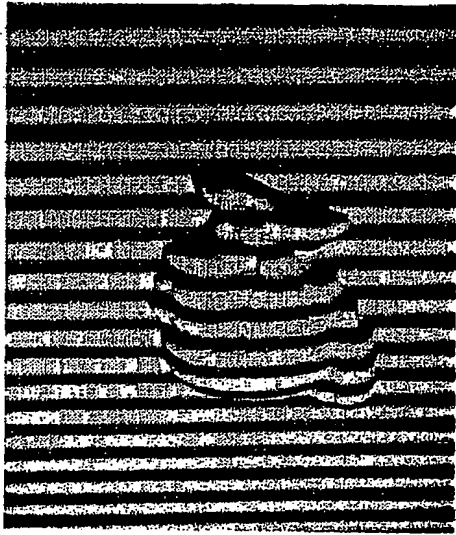
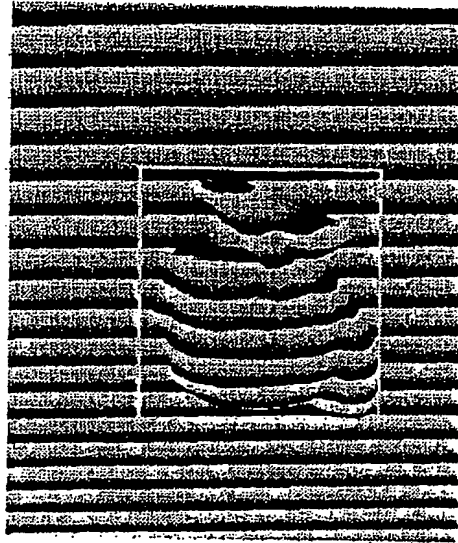


FIG-11B



【図12】

FIG-12



【図13】

FIG-13



## 【国際調査報告】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/US98/27915

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC(6) : G06F 15/00, 15/62; G06T 15/00  
US CL : 345/419, 423, 425

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

U.S. : 345/419, 423, 425

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
ACM SIGGRAPH '87 (Computer Graphics)

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

APS

search terms: surface contouring, fringe pattern, phase shift

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5,038,291 A (WANG ET AL.) 06 August 1991, see figure 4.	1-20
A	US 5,550,960 A (SHIRMAN ET AL.) 27 August 1996, see figure 2.	1-20
X	NADAS ET AL. "GRAPE: An Environment to Build Display Processes" ACM Computer Graphics, vol. 21, no. 4, July 1987, pages 75-84.	1-20

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	* T	later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
* A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	* X	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
* B* earlier document published on or after the international filing date	* Y	document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
* L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	* A*	document member of the same patent family
* O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means		
* P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		

Date of the actual completion of the international search

22 MARCH 1999

Date of mailing of the international search report

20 APR 1999

Name and mailing address of the ISA/US  
Commissioners of Patents and Trademarks  
Box PCT  
Washington, D.C. 20231

Facsimile No. (703) 305-3230

Authorized officer

PHU KHAC NGUYEN

Telephone No. (703) 305-9796

Joni Hill

## フロントページの続き

(81)指定国 EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AP(GH, GM, KE, LS, MW, SD, SZ, UG, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, VN, YU, ZW

Fターム(参考) 2F065 AA53 BB05 DD03 EE00 EE03

FF08 GG03 HH06 HH07 JJ03

JJ13 JJ19 JJ26 LL11 NN08

PP23 QQ00 QQ03 QQ16 QQ17

QQ26 QQ42 SS02 SS13

SB057 AA01 BA00 DA01 DB09 DC16

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**